

IMPLEMENTASI METODE LINIER EKUIVALEN DAN NONLINIER DALAM MEMPREDIKSI RESPON SEISMIK AREA KAMPUNG MELAYU, KOTA BENGKULU

Ega Yulita Sari¹, Lindung Zalbuin Mase^{1*}, Hardiansyah¹, Rena Misliniyati¹, Khairul Amri¹

¹Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Bengkulu

e-mail : lmase@unib.ac.id

Abstrak Kota Bengkulu terletak pada pertemuan antara Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia yang menjadi pertimbangan adanya gempa besar yang mungkin terjadi. Penelitian ini berlokasi di Kecamatan Kampung Melayu. Titik penelitian didominasi oleh tanah pasir dengan klasifikasi tanah keras (SC) dan tanah sedang (SD). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respon seismik pada daerah yang dianggap berpotensi terganggu menggunakan perbandingan linier ekuivalen dan nonlinier. Analisis respon seismik dilakukan menggunakan metode *Pressure Dependent Hyperbolic* (PDH) yang menghasilkan parameter tanah berupa *Peak Ground Acceleration* (PGA), percepatan respon spektra periode panjang 1 detik dan periode pendek 0,2 detik, dan faktor amplifikasi. Penggunaan metode ini memberikan hasil sesuai dengan perilaku tanah. Hasil yang didapat dari penelitian ini menunjukkan linier ekuivalen memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan nilai nonlinier. Permodelan linier ekuivalen menunjukkan terjadi overestimasi yang mempengaruhi nilai percepatan maksimum lebih tinggi dari model nonlinier. Oleh karena itu permodelan nonlinier lebih relevan digunakan dan menggambarkan kondisi lapangan.

Kata Kunci: Gempa; Kampung Melayu; Linier Ekuivalen; Nonlinier; Respon Seismik

Abstract. Bengkulu City is situated at the confluence of the Eurasian Plate and the Indo-Australian Plate, which is a consideration for large earthquakes that may occur. This research is located in Kampung Melayu sub-district. This research point is dominated by sandy soil with the classification of hard soil (SC) and medium soil (SD). This research aims to analyze the seismic response in areas that are considered potentially disturbed using equivalent linear and nonlinear comparisons. The seismic response analysis was conducted using the *Pressure Dependent Hyperbolic* (PDH) method which produces soil parameters in the form of *Peak Ground Acceleration* (PGA), spectral response acceleration of 1 second length period and 0,2 second short period, and amplification factor. This method provides results in accordance with the behavior of the soil. Obtained results from this research show the equivalent linear has a higher value when compared to the nonlinear value. Equivalent linear modeling shows an overestimation that affects the maximum acceleration value higher than the nonlinear model. Therefore, nonlinear modeling is more relevant to use and describes field conditions.

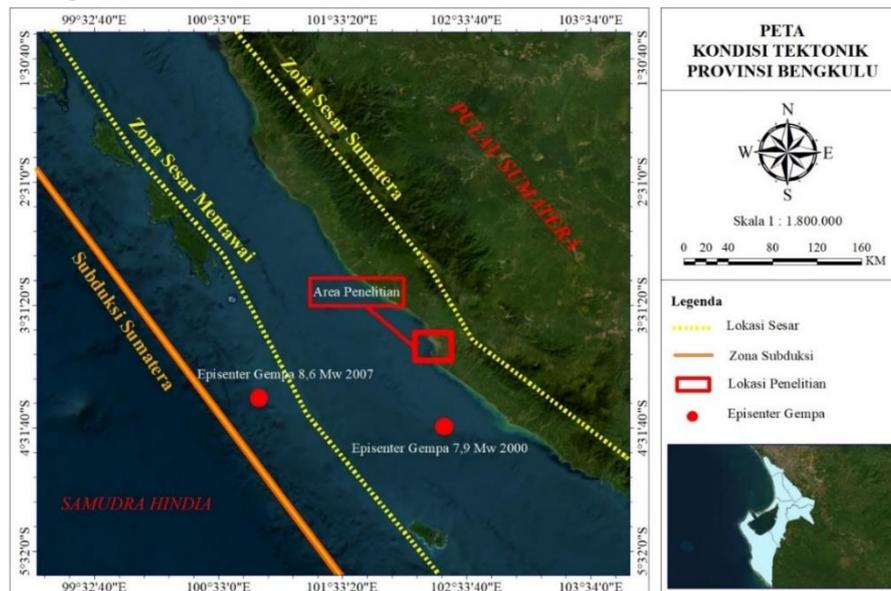
Keywords: Earthquake; Kampung Melayu; Linear Equivalent; Nonlinear; Response Spectra

PENDAHULUAN

Kota Bengkulu dikenal sebagai wilayah dengan tingkat gempa yang tinggi. Hal ini dipicu oleh pertemuan lempeng Eurasian dan Indo-Australia yang sering dikenal dengan zona subduksi. Pertemuan antar lempeng ini mengakibatkan terjadinya gempa dengan skala 7,9 M_w pada 4 Juni 2000 dan 8,6 M_w pada 12 September 2007. Gempa yang terjadi pada tahun 2007 memiliki dampak kerusakan yang lebih besar dari gempa yang terjadi sebelumnya dan diasumsikan sebagai gempa pengendali di Kota Bengkulu (Mase, 2020). Kota Bengkulu juga berada dekat dengan dua patahan aktif terlihat pada Gambar 1, yaitu patahan Sumatra dan patahan Mentawai. Patahan ini dikenal dengan patahan Semangko dan dikategorikan sebagai zona sesar geser. Gempa yang berpusat dekat patahan lebih berisiko mengalami kerusakan meskipun dengan magnitudo kecil (Qodri dkk., 2019).

Adampira dkk. (2015) menyebutkan peristiwa gempa bumi yang terjadi pada area dekat patahan cenderung menunjukkan kerusakan yang signifikan. Peristiwa-peristiwa gempa seperti yang terjadi di San Francisco (1906), Northridge (1994), Loma Poerta (1989), Kobe (1995), Duzce (1999), Chi-chi (1999), Hokkaido (2003) menjelaskan bahwa area yang dekat dengan patahan cenderung mengalami kerusakan yang signifikan. Pergerakan tanah yang terjadi pada zona dekat patahan menyebabkan terjadinya pergeseran horizontal dan vertikal yang besar, kerusakan struktural yang berat, frekuensi dan intensitas getaran yang tinggi, serta dampak lingkungan yang lebih besar. Dampak yang ditimbulkan akibat gempa terjadi didasarkan

oleh jarak epicenter, besarnya skala gempa, mekanisme sumber gempa, kondisi geologi tanah, dan kualitas infrastruktur dilokasi penelitian.



Gambar 1. Kondisi Seismotektonik di Provinsi Bengkulu

Kota Bengkulu memiliki formasi geologi yang beragam diantaranya formasi berupa Undak Alluvium (Qat) yang tersusun atas lempung, lanau, pasir serta campuran kerikil. Formasi Bintunan (QTb) dan Adesit (Tpan) didominasi oleh batuan beku dan konglomerat. Formasi Endapan Alluvium (Qa) dan Batu Gamping Terumbu Karang (QI) tersusun atas bongkah, lanau, lempung, lumpur, pasir, dan kerikil. Selanjutnya Formasi Endapan Rawa (Qs) terletak di bagian utara dan timur Kota Bengkulu yang tersusun atas lumpur, gambut, tanah liat, dan pasir (Farid dan Mase, 2020). Berdasarkan kondisi tektonis dan geologi, kawasan Kota Bengkulu memiliki potensi gempa yang cukup besar. Kerusakan terbesar pada tahun 2000 dan 2007 akibat gempa terdeteksi di wilayah barat Kota Bengkulu. Kawasan ini berada di atas Formasi Qat dan Qa termasuk wilayah yang padat penduduk (Sugianto dkk., 2017). Kampung Melayu termasuk wilayah di Kota Bengkulu dengan Formasi geologi Qat dan Qa. Beberapa bangunan yang terdapat di Kecamatan Kampung Melayu diantaranya ada pelabuhan, perkantoran, bangunan sekolah serta perumahan.

Beberapa penelitian terdahulu melakukan analisis respon seismik permukaan tanah menggunakan perbandingan linier ekuivalen dan nonlinier dengan merambatkan beberapa rekaman gelombang gempa yang pernah terjadi. Adampira dkk., (2015) melakukan penelitian daerah dekat patahan dengan merambatkan gelombang gempa Loma, Prierta, Kocaeli dan Chi-chi. Yunita dkk., (2015) menggunakan gelombang gempa Duzce (Turki) untuk gempa jarak pendek dan Northridge untuk analisis gempa jarak jauh. Penelitian juga dilakukan Misliniyati dkk. (2019) dengan menambahkan model elastis linier dalam analisis respon seismik yang dilakukan dan menggunakan perambatan gelombang gempa Kobe 1995. Selanjutnya untuk kondisi respons seismik kota Bengkulu dilakukan dengan merambatkan gelombang gempa terbesar dalam kurun waktu 20 tahun terakhir dilakukan oleh Agustina dkk., (2019) dengan menggunakan model nonlinier. Penelitian ini menunjukkan perlunya pembaharuan desain seismik untuk Kota Bengkulu.

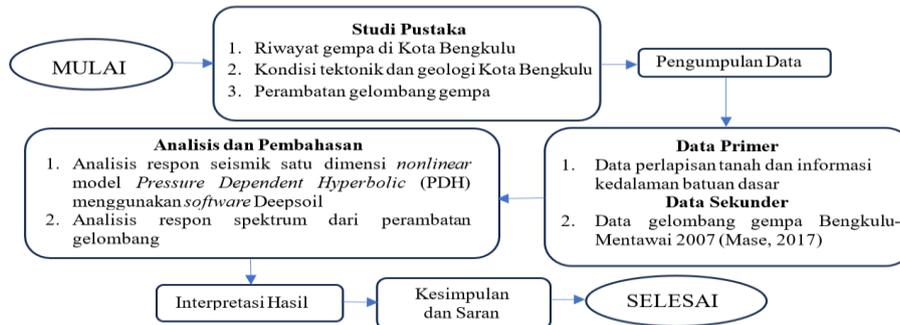
Penelitian terdahulu terfokus pada potensi likuifaksi pada daerah terjadi gempa dan melakukan perbandingan linier, linier ekuivalen, dan nonlinier. Perambatan gelombang gempa menggunakan rekaman gerakan tanah yang terjadi di luar Bengkulu. Pada penelitian ini penulis melakukan analisis respons seismik dengan menggunakan dua perbandingan, yaitu perbandingan analisis respons seismik linier ekuivalen dan analisis respons seismik nonlinier. Dengan merambatkan gelombang gempa yang lebih menggambarkan kondisi lokal di Kota Bengkulu.

METODOLOGI

1. Rancangan Penelitian

Gambar 2 menyajikan alur penelitian ini. Penelitian dimulai dengan melakukan tinjauan pustaka terkait riwayat gempa, kondisi tektonik dan geologi Kota Bengkulu. Selanjutnya meninjau penelitian terdahulu terkait

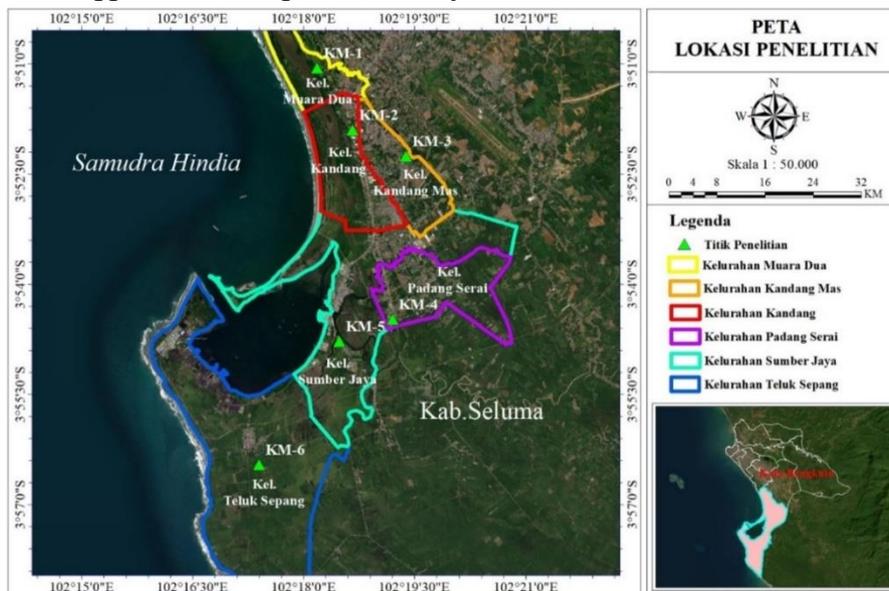
perambatan gelombang gempa Kota Bengkulu. Setelah itu, mengumpulkan informasi data primer dan sekunder yang dibutuhkan. Data primer diambil melalui investigasi lokasi menggunakan pengukuran mikrotremor. Untuk data sekunder dibutuhkan perambatan gelombang yang mewakili kondisi lokal, maka digunakan gelombang gempa Bengkulu-Mentawai 2007. Analisis data pada penelitian ini menggunakan model *Pressure Dependent Hyperbolic* (PDH). *Output* yang dihasilkan dari permodelan ini dilakukan analisis respon spektrum dari nilai perambatan gelombang. Analisis yang dilakukan menghasilkan nilai perbandingan antara model linier ekuivalen dan nonlinier.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

2. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada wilayah Kecamatan Kampung Melayu Kota Bengkulu. Pengambilan data lapangan dilakukan di 6 titik pengukuran mikrotremor. Gambar 3 menunjukkan persebaran titik terletak di Kelurahan Muara Dua (KM-1), Kelurahan Kandang (KM-2), Kelurahan Kandang Mas (KM-3), Kelurahan Padang Serai (KM-4), Kelurahan Sumber Jaya (KM-5), dan Kelurahan Teluk Sepang (KM-6). Jarak antar titik penelitian tercatat dari KM-1 ke KM-2 adalah 1,78 km; KM-2 ke KM-3 adalah 1,49 km; KM-3 ke KM-4 adalah 4,10 km; KM-4 ke KM-5 adalah 1,44 km; dan KM-5 ke KM-6 adalah 3,69 km. Lokasi pengukuran ini membutuhkan wilayah yang cukup luas, sunyi, dan memiliki bidang tanah yang rata. Kampung Melayu juga sebagai zona pelabuhan lokal yang berada di Kelurahan Sumber Jaya. Penelitian di wilayah ini penting karena memiliki kerentanan seismik yang cukup tinggi. Kampung Melayu khususnya menunjukkan nilai amplifikasi seismik maksimal tertinggi di Kota Bengkulu (Misliniyati dkk., 2024).

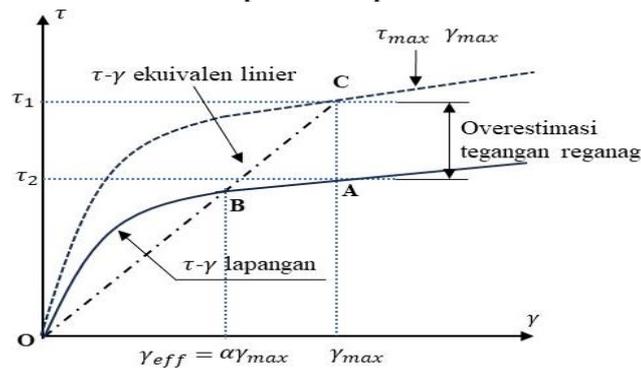


Gambar 3. Peta Lokasi Kecamatan Kampung Melayu

3. Teknik Pengambilan dan Pengembangan Data

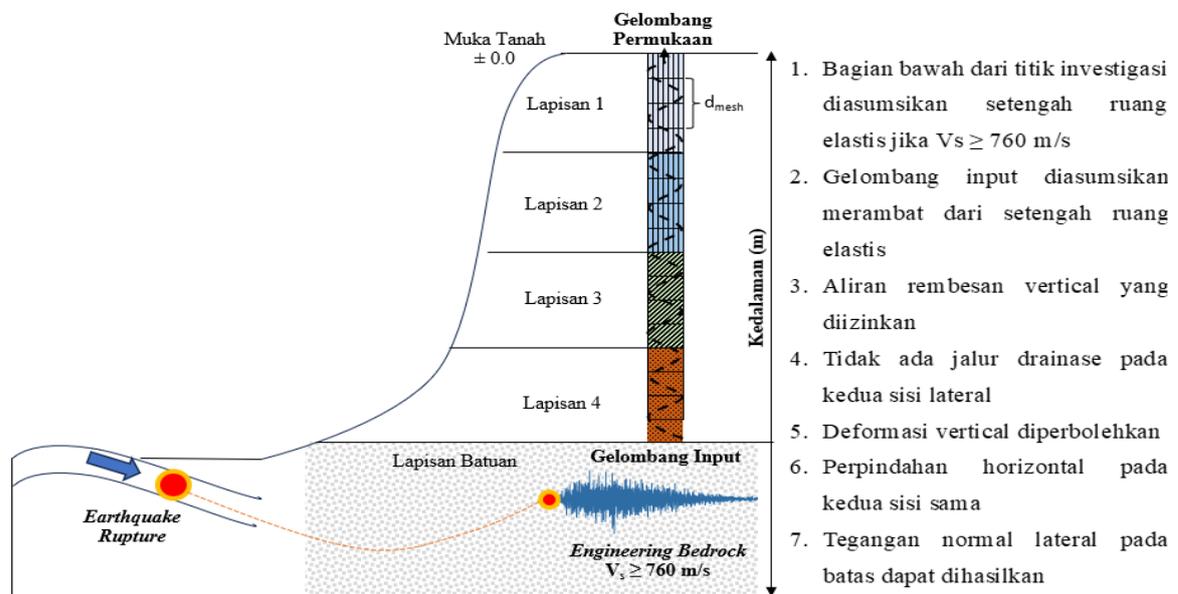
Analisis respons seismik linier ekuivalen dan nonlinier dilakukan dengan menggunakan model *Pressure Dependent Hyperbolic* (PDH) untuk memodelkan pelapisan tanah. Model ini menggambarkan bagaimana tanah merespon gelombang gempa kemudian dirambatkan melalui model untuk menentukan dampaknya. Penggunaan permodelan PDH dapat memberikan hasil yang sesuai dengan perilaku tanah dilokasi gempa (Likitlersuang dkk., 2020). Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan respon seismik model linier

ekuivalen dan model nonlinier. Yunita dkk. (2015) menyebutkan bahwa model tanah linier ekuivalen menghasilkan nilai modulus geser yang konstan selama gempa, baik pada regangan kecil maupun besar. Model ini tidak dapat menunjukkan perubahan kekakuan yang seharusnya terjadi pada pembebanan siklik. Sementara itu, model tanah nonlinier modulus geser berubah secara konstan bergantung pada tingkat regangan. Model ini konsisten dengan perilaku tanah yang nonlinier dan menunjukkan perilaku inelastis. Gambar 4 menunjukkan terjadi overestimasi pada model linier ekuivalen pada kurva tahanan-regangan (Yoshida, 2015). Model linier ekuivalen mencapai tegangan maksimum pada $\gamma = \gamma_{max}$ adalah τ_1 di titik C, sementara tegangan geser yang relevan berada pada $\gamma = \gamma_{max}$ di titik A. Hal ini menggambarkan pada tegangan maksimum linier ekuivalen terjadi overestimasi ketika berada dalam keadaan plastis sempurna.



Gambar 4. Kurva Tegangan-Regangan (Modifikasi dari Yoshida., 2015)

Kim dkk. (2016) menunjukkan bahwa metode analisis nonlinier lebih efektif dalam memahami bagaimana tanah lunak berperilaku selama gempa besar, karena metode ini memperhitungkan perubahan dinamis dalam sifat tanah. Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih realistis tentang risiko dan perilaku tanah dalam kondisi seismik. Penggunaan model linier ekuivalen memiliki keterbatasan pada tanah lunak dalam analisis respon seismik (Misliniyati dkk., 2019). Untuk lokasi penelitian yang memiliki data tanah yang lengkap, penggunaan metode nonlinier relatif lebih akurat terhadap respons tanah akibat gempa kuat dan tanah lunak (Adampira dkk., 2015; Talukder dkk., 2021).



Gambar 5. Skema Perambatan Gelombang (Dimodifikasi dari Mase dkk., 2022))

Analisis responseismik dilakukan dengan membuat model pelapisan tanah dan merambatkan gelombang gempa melalui model tersebut. Gelombang gempa yang digunakan sebagai *input* merujuk pada data dari gempa Bengkulu-Mentawai 2007 yang dikembangkan oleh Mase (2017). Proses analisis ini memetakan perjalanan gelombang gempa dari batuan dasar melalui berbagai lapisan tanah hingga mencapai permukaan. Gambar 5 menggambarkan tahapan perambatan ini, memperlihatkan bagaimana gelombang gempa berinteraksi dengan setiap lapisan tanah dan mempengaruhi respons di permukaan. Perambatan gelombang ini menghasilkan *output*

berupa percepatan tanah maksimum, percepatan respon spektra, dan nilai faktor amplifikasi. Langkah selanjutnya melakukan perbandingan model ekuivalen linier dan nonlinier menggunakan grafik-grafik perbandingan. Ukuran *mesh* pada model ini didapat menggunakan analisis panjang gelombang, terlihat pada persamaan 1. Dalam penelitian ini, frekuensi maksimum diasumsikan 33 Hz untuk memastikan bahwa analisis mencakup rentang frekuensi yang relevan dengan karakteristik seismik dan tanah di lokasi penelitian. Meskipun frekuensi minimum yang ditetapkan oleh Hashash dkk. (2015) adalah 30 Hz, frekuensi maksimum 33 Hz dipilih untuk mencakup komponen frekuensi tinggi yang mungkin berpengaruh pada respon tanah. Pilihan ini juga selaras dengan pedoman standar dan data empiris yang menunjukkan bahwa rentang frekuensi ini memadai untuk analisis seismik yang akurat.

Selanjutnya melakukan pembuatan desain respon spektrum berdasarkan perambatan gelombang yang dihasilkan. Desain ini dilakukan dengan mengacu pada SNI 1726-2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Langkah berikutnya adalah pembacaan nilai percepatan respon spektra untuk periode pendek (S_s) 0,2 detik, periode panjang (S_l) 1 detik, dan perhitungan faktor amplifikasi. Dengan menghubungkan hasil perhitungan nilai S_{DS} , S_{DI} , T_0 , T_S , dan SA , desain respons spektrum untuk Kecamatan Kampung Melayu diperoleh. Selanjutnya, nilai faktor amplifikasi ditentukan sesuai dengan Persamaan 2. Berikut adalah persamaan yang digunakan dalam pengolahan data untuk menganalisis respon spektrum:

Menghitung ukuran *mesh* profil tanah

$$D = \frac{V_s}{4F_{maks}} \quad (1)$$

Dengan:

D = Ukuran *mesh*

V_s = Kecepatan gelombang geser

F_{maks} = Frekuensi maksimum

Menghitung faktor amplifikasi

$$AF = \frac{PGA_{permukaan}}{PGA_{input}} \quad (2)$$

Dengan:

AF = Faktor amplifikasi

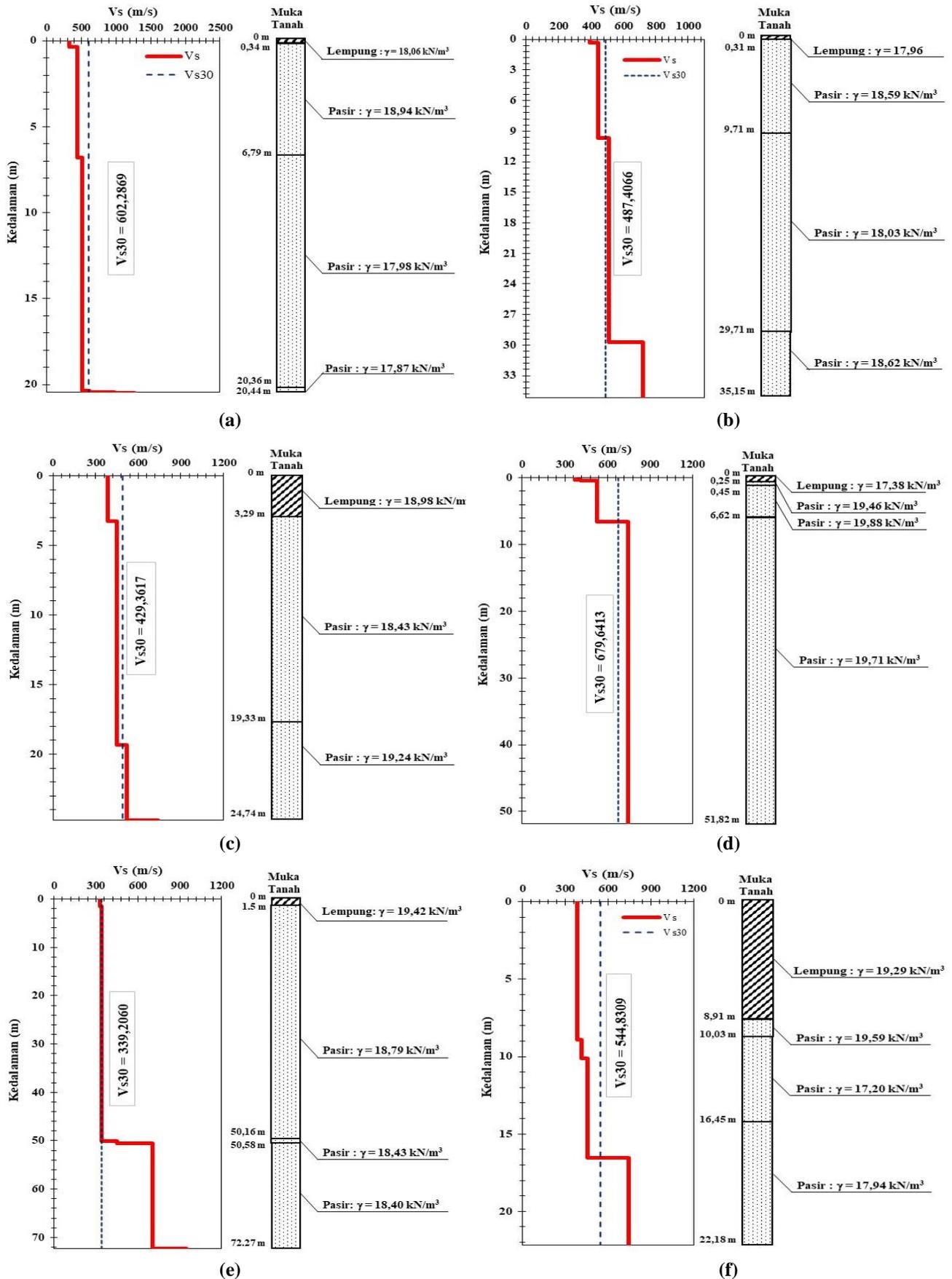
$PGA_{permukaan}$ = Percepatan tanah permukaan

PGA_{input} = Percepatan tanah *input motion*

4. Teknik Analisis Data

Data pelapisan tanah yang diperoleh mencakup jenis tanah, ketebalan setiap lapisan tanah (h), berat isi tanah (γ), kecepatan gelombang geser (V_s) dan kedalaman batuan dasar. Data permukaan batuan dasar sangat dibutuhkan dalam mengetahui respon tanah saat terjadi gempa (Mase, 2017). Secara luas, data ini digunakan dalam pemodelan numerik, penilaian respons lokasi di masa depan, analisis respon seismik tanah, dan peninjauan bahaya seismik. Analisis respon tanah dengan memperhitungkan perilaku tanah secara nonlinier sangat penting dalam merancang bangunan yang aman dan tahan gempa.

Hasil pelapisan tanah menunjukkan bahwa lokasi penelitian didominasi oleh lapisan tanah pasir, sementara lapisan lempung memiliki ketebalan berkisar antara 0,25 m hingga 8,91 m. Kecepatan gelombang geser (V_s) digunakan untuk menilai kekakuan tanah dan batuan serta memprediksi respon terhadap gempa. Nilai V_s pada kedalaman 30 meter penting untuk klasifikasi situs tanah karena pembesaran gelombang gempa umumnya berpengaruh hingga kedalaman tersebut (Hadi dkk., 2021). Penentuan nilai V_s pada kedalaman ini membantu dalam mengidentifikasi kelas situs tanah yang berhubungan dengan risiko seismik, sehingga penting untuk perancangan bangunan tahan gempa. Kecepatan gelombang geser yang lebih tinggi menunjukkan tanah yang lebih kaku, sedangkan kecepatan yang lebih rendah menunjukkan tanah yang lebih lunak dan lebih rentan terhadap pembesaran gelombang gempa. Gambar 6 menunjukkan nilai V_{s30} masing-masing titik yaitu KM-1 602,29 m/s, KM-2 487,41 m/s, KM-3 429,36 m/s, KM-4 679,64 m/s, KM-5 339,21 m/s, dan KM-6 544,83 m/s. Berdasarkan klasifikasi kelas situs tanah, titik KM-1, KM-2, KM-3, KM-4, dan KM-6 masuk kedalam kelas situs tanah keras (SC) dan titik KM-5 masuk kelas situs tanah sedang (SD) (Badan Standardisasi Nasional., 2019).

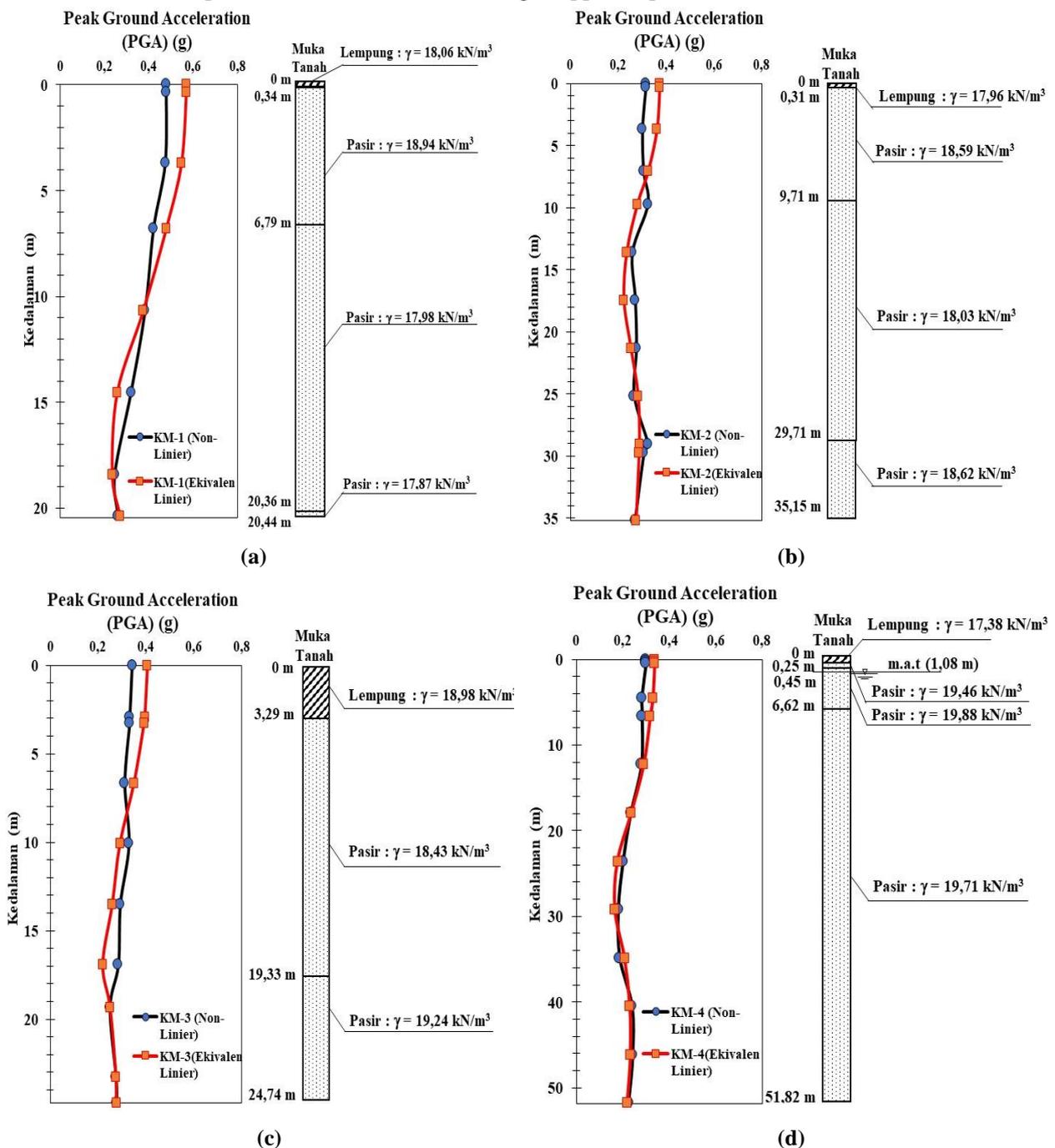


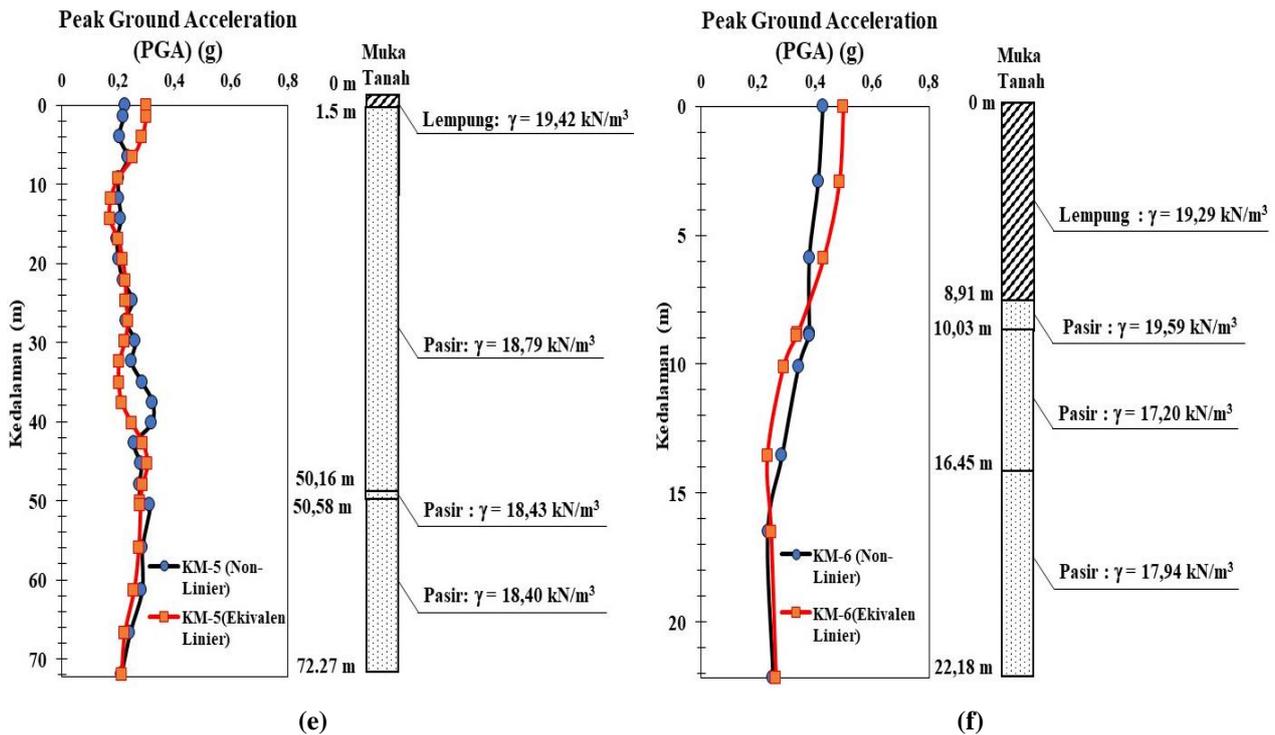
Gambar 6. Data Penyelidikan Tanah (a) Kel.Muara Dua (KM-1), (b) Kel.Kandang (KM-2), (c) Kel.Kandang Mas (KM-3), (d) Kel.Padang Serai (KM-4), (e) Kel.Sumber Jaya (KM-5), dan (f) Kel.Teluk Sepang (KM-6).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Peak Ground Acceleration (PGA)

Percepatan tanah maksimum digunakan untuk mengetahui informasi dari respon seismik pada wilayah yang diteliti. Kesalahan estimasi nilai PGA dapat mempengaruhi kerusakan struktur saat gempa terjadi. Semakin besar nilai percepatannya maka semakin besar dampak atau risiko kerusakan yang diakibatkan oleh gempa. Nilai PGA pada interval 0,3g-0,4g memiliki risiko gempa tinggi sedangkan untuk nilai PGA > 0,4g memiliki risiko gempa sangat tinggi. Campbell (1997) menyebutkan percepatan tanah puncak merupakan salah satu parameter penting dalam mengukur dampak gempa. Hasil penelitian ini menyebutkan nilai PGA untuk wilayah KM-1 dan KM-6 dengan interval 0,43g-0,57g memiliki risiko gempa sangat tinggi dengan nilai PGA > 0,4g. Wilayah KM-2, KM-3, KM-4 dan KM-5 menunjukkan nilai PGA antara 0,22g-0,4g memiliki risiko gempa tinggi. Nilai ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyebutkan untuk nilai percepatan tanah maksimum Kota Bengkulu secara umum berkisar 0,2g hingga 0,4 g (Puteri dkk., 2019).



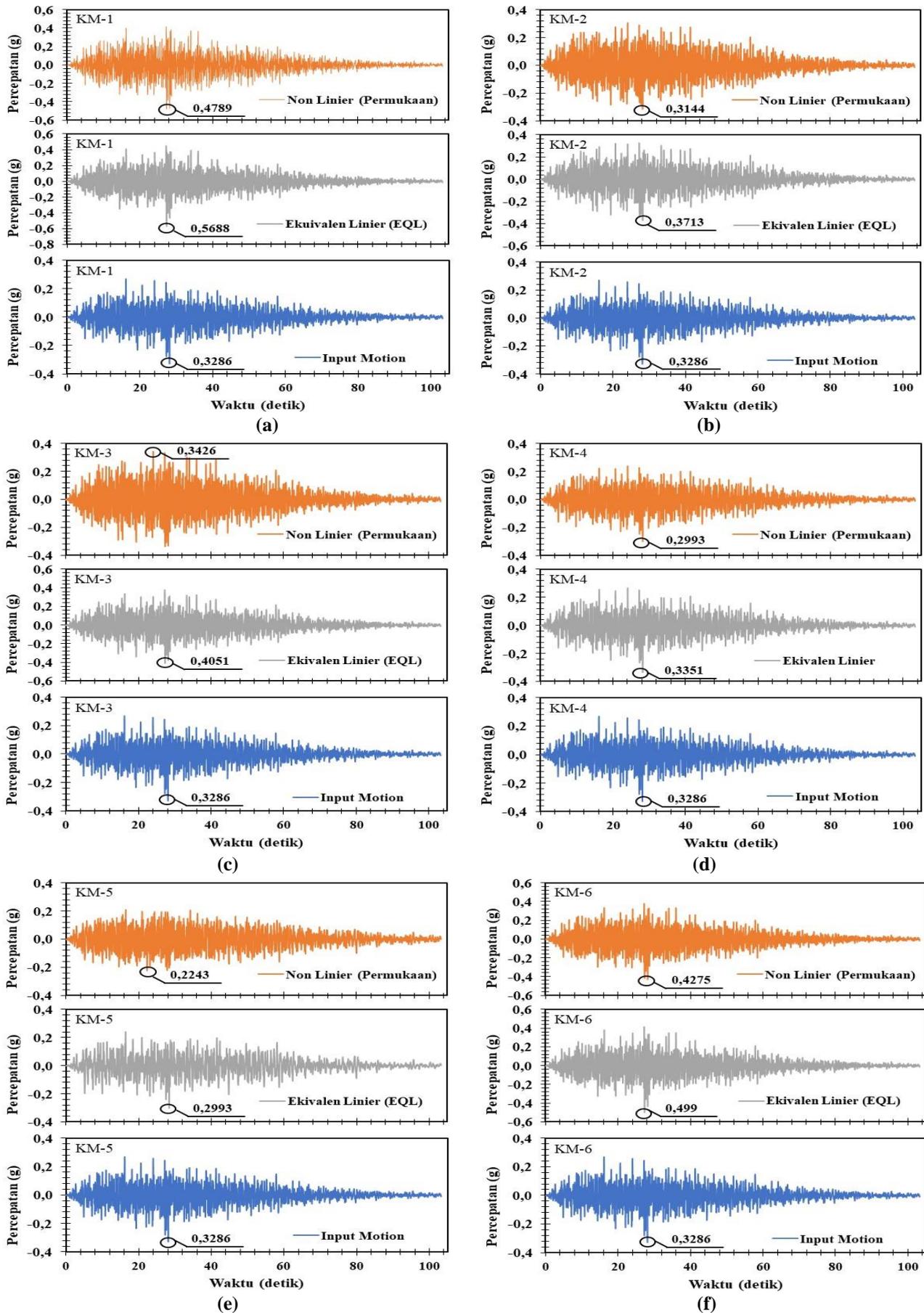


Gambar 7. Hasil Analisis Nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) (a) KM-1, (b) KM-2, (c) KM-3, (d) KM-4, (e) KM-5 dan (f) KM-6

Gambar 7 menunjukkan bahwa permodelan nonlinier untuk lapisan permukaan menghasilkan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) yang lebih kecil dibandingkan dengan model linier ekuivalen. Penelitian sebelumnya, seperti yang dijelaskan oleh Yunita dkk. (2015) menunjukkan bahwa model linier ekuivalen cenderung menghasilkan nilai percepatan yang lebih tinggi pada lapisan permukaan dibandingkan dengan model nonlinier. Permodelan linier ekuivalen sering kali memberikan estimasi parameter gerakan tanah yang berlebihan sehingga mengakibatkan nilai PGA yang terlalu tinggi. Gerakan tanah di lokasi ini menunjukkan amplifikasi seismik, menyebabkan PGA di permukaan lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan bawah tanah. Amplifikasi ini disebabkan oleh kondisi geologi yang bervariasi di daerah tersebut, sehingga PGA di permukaan cenderung lebih besar (Mase, 2020). Kampung Melayu terletak di area dengan Formasi Undak Alluvium (Qat), yang terdiri dari lempung, lanau, pasir, dan campuran kerikil (Farid and Mase, 2020; Hadi dkk., 2021). Karakteristik sedimen tanah antara batuan dasar dan permukaan berkontribusi pada peningkatan PGA di permukaan, sebagaimana diperkuat oleh Tempa dkk., (2020).

2. Riwayat Waktu Percepatan Gelombang Gempa

Gambar 8 menunjukkan bahwa percepatan rambat gelombang gempa di permukaan tanah pada model linier ekuivalen lebih tinggi dibandingkan dengan model nonlinier. Perbedaan ini disebabkan oleh fakta yang menyebutkan model linier ekuivalen tidak memperhitungkan perubahan perilaku tanah pada tingkat deformasi besar, sehingga memberikan estimasi percepatan yang lebih tinggi. Sebaliknya, model nonlinier memperhitungkan penurunan kekakuan tanah, efek histeresis, dan kerusakan material, sehingga menghasilkan nilai percepatan yang lebih rendah namun lebih akurat dalam mencerminkan kondisi tanah yang sebenarnya. Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyebutkan bahwa dalam analisa respons tanah menggunakan linier ekuivalen menunjukkan terjadinya kenaikan PGA secara relatif, sedangkan untuk analisis nonlinier menunjukkan adanya penurunan relatif PGA, ini terjadi dengan alasan bahwa sifat linier dari analisis linier ekuivalen (Adampira dkk., 2015). Untuk nilai model linier ekuivalen dan model nonlinier tertinggi pada titik lokasi di KM-1 dengan nilai 0,5688g dan 0,4789g. Nilai linier ekuivalen dan nonlinier terkecil berada pada titik KM-5 dengan nilai 0,2993g dan 0,2243g.

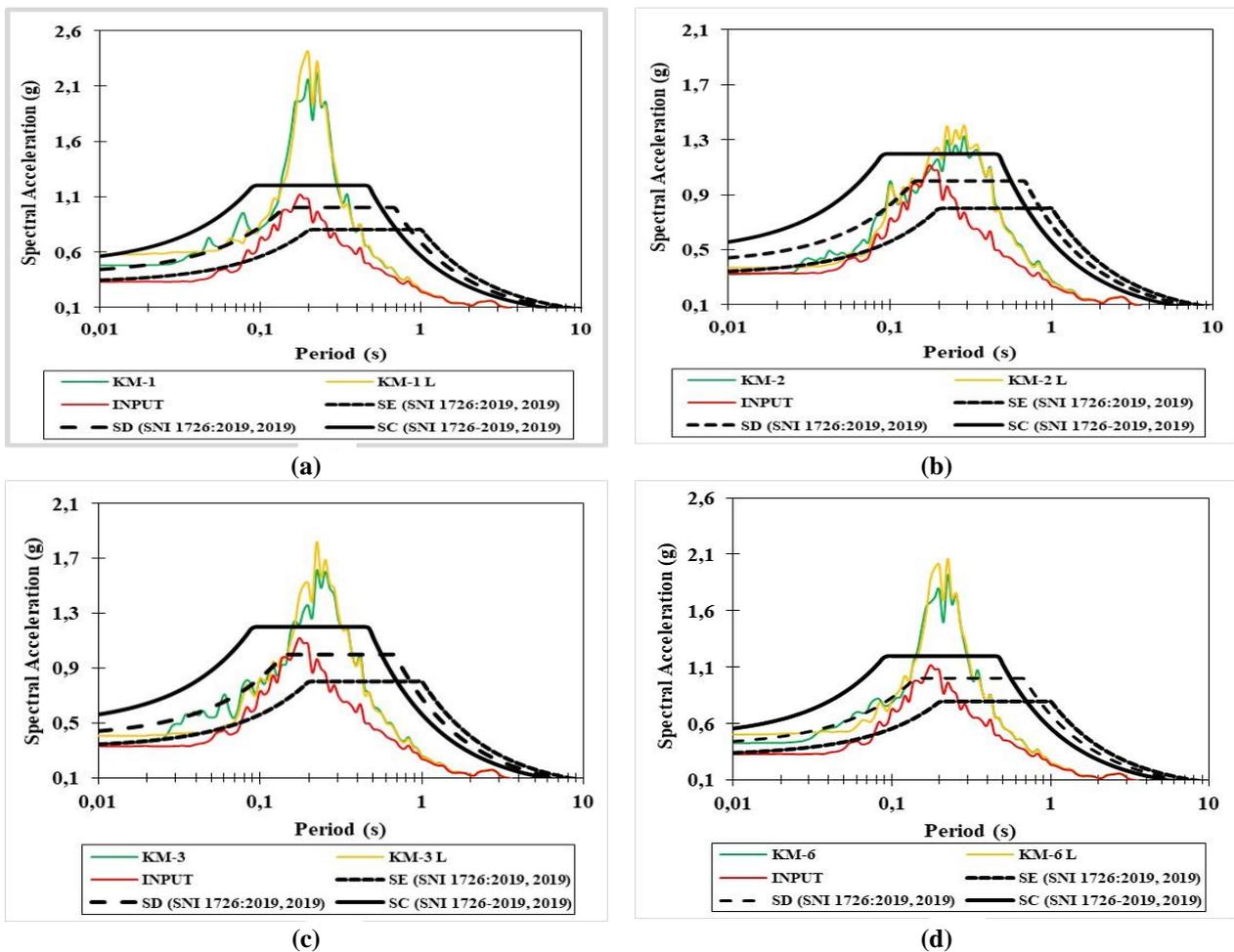


Gambar 8. Riwayat Waktu Percepatan Gelombang Gempa

3. Percepatan Respon Spektra Perperiode (PSA)

Penelitian ini menghasilkan perbandingan percepatan spektra gelombang *input* dengan spektra di permukaan nonlinier dan ekuivalen linier. Percepatan spektra rancangan Indonesia juga ditunjukkan dengan garis-garis hitam, yang mewakili setiap desain tanah keras, tanah sedang, tanah lunak. Analisis percepatan spektra menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang besar antara nilai model linier ekuivalen dan model nonlinier di wilayah ini, sementara perambatan gelombang *input motion* di beberapa titik menunjukkan rentang variasi yang cukup besar.

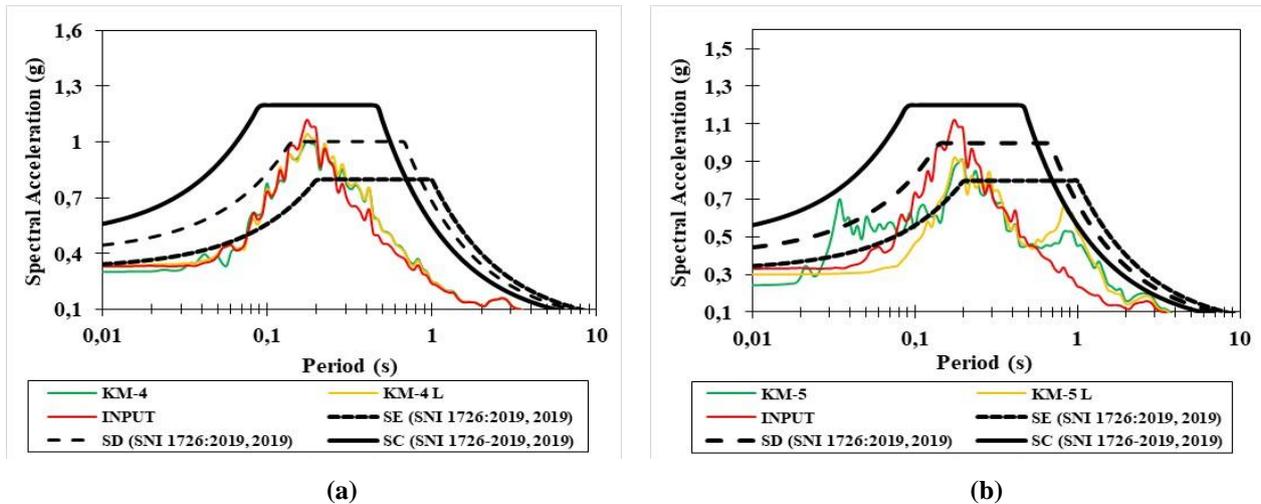
Hasil yang ditunjukkan Gambar 9 terjadi peningkatan nilai percepatan pada permukaan tanah jika dibandingkan dengan gelombang *input*. Nilai ini menunjukkan adanya amplifikasi spektra saat perambatan gelombang seismik (Mase dkk., 2022). Peningkatan nilai percepatan spektra ini melebihi nilai spesifikasi yang ditentukan dalam SNI 1726:2019, dengan rentang nilai periode 0,2 detik hingga 0,3 detik. Dampak kerusakan yang ditimbulkan akibat gempa pada titik ini terjadi pada bangunan berlantai rendah hingga sedang. Penelitian terdahulu menyebutkan potensi risiko ancaman bahaya gempa untuk Kampung Melayu didominasi berada pada kategori risiko sedang (Hadi dkk., 2021). Maka dapat dikatakan untuk lokasi yang melewati standar yang ditetapkan SNI 1726:2019 dibutuhkan peninjauan ulang untuk bangunan berlantai rendah. Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyebutkan nilai T_n sebesar 0,2 detik digunakan dalam memprediksi respon tanah pada bangunan berlantai rendah dengan estimasi bangunan berlantai 1 sampai 2 (Mase., 2020). Jika dilihat dari lapisan tanah pada Gambar 7 menunjukkan untuk titik KM-1, KM-2, KM-3, dan KM-6 memiliki batuan dasar yang lebih dangkal, sehingga memicu respon yang lebih besar dalam perambatan gelombang hingga ke permukaan tanah.



Gambar 9. Hasil Analisis Nilai Percepatan Respon Spektra (PSA) KM-1, KM-2, KM-3, dan KM-6

Gambar 10 menunjukkan nilai percepatan spektra untuk gelombang *input* lebih besar dibandingkan dengan permukaan tanah dan nilai percepatan gempa tidak melewati desain perencanaan SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Titik ini menunjukkan bahwa hasil respon spektra relatif cukup aman ketika terjadi gempa kuat. Percepatan spektra permukaan yang tidak melewati kode desain seismik

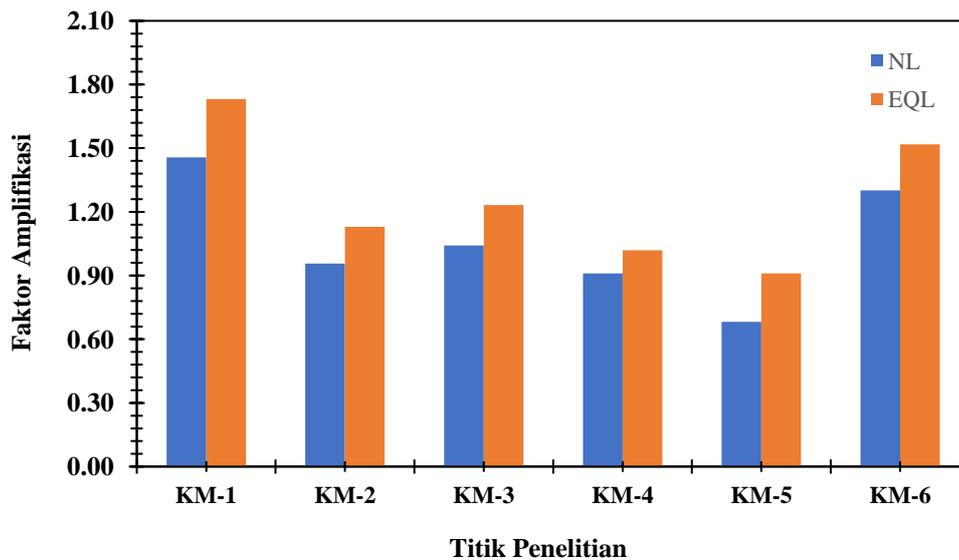
menunjukkan bahwa bangunan yang dibangun di titik tersebut telah mempertimbangkan pengaruh gerakan tanah sebenarnya saat terjadi gempa (Mase dkk., 2022).



Gambar 10. Hasil Analisis Nilai Percepatan Respon Spektra (PSA) KM-4 dan KM-5

4. Faktor Amplifikasi

Faktor amplifikasi adalah terjadinya perbesaran gelombang akibat perbedaan signifikan pada lapisan tanah yang dilewati, semakin besar perbedaan lapisan maka akan semakin besar perbesaran gelombang yang terjadi. Formasi geologi yang beragam, sifat fisis, dan ketebalan lapisan batuan dapat mempengaruhi perbesaran gelombang yang terjadi saat gempa (Aditama dkk., 2020). Dalam analisis ini, perbandingan dilakukan antara nilai PGA dari *input motion* dan PGA permukaan yang diperoleh melalui model linier ekuivalen dan nonlinier. Model linier ekuivalen seringkali memberikan estimasi amplifikasi yang lebih besar karena mengabaikan efek nonlinier pada tanah, sedangkan model nonlinier mempertimbangkan penurunan kekakuan tanah dan efek histeresis yang memberikan gambaran amplifikasi yang lebih realistis. Perbedaan hasil antara kedua model ini menunjukkan seberapa besar pengaruh karakteristik tanah dan formasi geologi terhadap amplifikasi gelombang gempa. Dengan memahami faktor amplifikasi dan bagaimana ia dipengaruhi oleh kondisi geologi, kita dapat lebih akurat dalam merancang struktur yang tahan gempa dan memprediksi dampak gempa di wilayah tertentu.



Gambar 11. Perbandingan Faktor Amplifikasi Linier Ekuivalen dan Nonlinier

Gambar 11 menunjukkan pada kelas situs tanah keras (SC) pada titik KM-1, KM-2, KM-3, KM-4, dan KM-6 memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan dengan kelas situs tanah sedang (SD) pada titik KM-5. Dari nilai tersebut dapat dilihat bahwa linier ekuivalen memiliki nilai faktor amplifikasi yang lebih besar dari

permodelan nonlinier. Nilai amplifikasi terbesar terjadi pada titik KM-1 dengan kelas situs tanah keras, sedangkan amplifikasi terkecil pada titik KM-5 dengan kelas situs tanah sedang. Sejalan dengan penelitian Talukder dkk. (2021), yang menyatakan untuk tanah dangkal dengan kelas situs tanah keras memiliki amplifikasi periode pendek yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan kelas situs tanah sedang. Semakin tinggi nilai faktor amplifikasi percepatan gelombang gempa untuk sampai kepermukaan tanah juga semakin besar. Penelitian terdahulu menyebutkan kerusakan bangunan saat terjadi gempa dipengaruhi amplifikasi gelombang seismik (Purnama dkk., 2021).

PENUTUP

Simpulan

Penelitian ini menghasilkan nilai perbandingan respon seismik linier ekuivalen dan nonlinier wilayah Kampung Melayu Kota Bengkulu, diantaranya:

1. Analisis respon tanah model linier ekuivalen menunjukkan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dipermukaan lebih besar dari lapisan bawah tanah sejalan dengan bervariasinya kondisi geologi Kampung Melayu. *Peak Ground Acceleration* (PGA) yang dihasilkan pada lokasi penelitian Kelurahan Muara Dua dan Kelurahan Teluk Sepang mencapai lebih dari 0,4g. Hal ini menunjukkan bahwa pada kawasan tersebut memiliki nilai percepatan yang tinggi dan risiko kerusakan akibat gempa semakin besar. Kelurahan Kandang, Kelurahan Kandang Mas, Kelurahan Padang Serai dan Kelurahan Sumber Jaya menunjukkan risiko gempa tinggi.
2. Percepatan Respon Spektra (PSA) menunjukkan bahwa tingkat kerusakan gedung untuk berlantai rendah hingga sedang itu terjadi di Kelurahan Muara Dua, Kandang, Kandang Mas, dan Sumber Jaya. Pada Kelurahan Padang Serai dan Teluk Sepang menunjukkan respon spektra relatif cukup aman saat gempa besar terjadi. Hasil ini dipengaruhi oleh titik lokasi yang didominasi oleh tanah pasir sehingga menyebabkan terjadinya pembesaran gelombang pada saat dipermukaan.
3. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA), Percepatan Respon Spektra (PSA), dan faktor amplifikasi linier ekuivalen memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan model nonlinier. Pada model linier ekuivalen terjadi overestimasi pada tegangan geser sehingga nilai PGA, PSA, dan faktor amplifikasi menjadi lebih besar. Perkiraan tegangan geser yang terlalu tinggi membuat nilai perkiraan percepatan semakin besar. Permodelan nonlinier menunjukkan perilaku tanah inelastis. Oleh karena itu permodelan nonlinier dianggap lebih relevan karena lebih menggambarkan kondisi lapangan.

Saran

1. Model linier ekuivalen sering kali menghasilkan overestimasi pada nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA), Percepatan Respon Spektra (PSA), dan faktor amplifikasi. Oleh karena itu, disarankan untuk menggunakan model nonlinier dalam analisis seismik. Model nonlinier lebih akurat dalam menggambarkan perilaku tanah dan dampak gempa karena mempertimbangkan efek inelastis dan penurunan kekakuan tanah.
2. Mengingat tingginya nilai PGA di Kelurahan Muara Dua dan Teluk Sepang, serta risiko gempa tinggi di Kelurahan Kandang, Kelurahan Kandang Mas, Kelurahan Padang Serai dan Kelurahan Sumber Jaya penting untuk meningkatkan desain struktur bangunan di area-area tersebut. Langkah ini mencakup penerapan standar desain tahan gempa yang lebih ketat dan mempertimbangkan karakteristik tanah spesifik di setiap lokasi.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Laboratorium Geoteknik Teknik Sipil Universitas Bengkulu, Wulansari Dwi Primaningtyas, S.T. dan Mase's Geotechnical Research Laboratory yang telah membantu dalam pengambilan dan pengolahan data dalam penelitian penulis.

DAFTAR PUSTAKA

Adampira, M., Alielahi, H., Panji, M., dan Koohsari, H. (2015), "Comparison of equivalent linear and nonlinear methods in seismic analysis of liquefiable site response due to near-fault incident waves: a case study", *Arabian Journal of Geosciences*, Vol.8, No.5, hal. 3103–3118. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1399-6>.

- Aditama, M.R., Saadi, A.G., Nurcahya, B.E. (2020), "Investigasi Kerentanan Tanah Berpotensi Likuefaksi Menggunakan Metode Mikroseismik Di Wilayah Prambanan, Yogyakarta", *Dinamika Rekayasa*, Vol.16, No.2, hal. 105–112. <https://doi.org/10.20884/1.dr.2020.16.2.323>.
- Agustina, S., Fikri, M.N., Anggraini, P.W., dan Mase, L.Z. dkk. (2019), "Analisis Respons Seismik Area Sentral Di Kota Bengkulu", *6th ACE Conference*, (April 2020), hal. 891–901.
- Badan Standardisasi Nasional (2019), "SNI 1726-2019: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Nongedung. Jakarta: Standar Nasional Indonesia", (8).
- Campbell, K.W. (1997), "Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra", *Seismological Research Letters*, Vol.68 No.1, hal. 154–179. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.154>.
- Farid, M. dan Mase, L.Z. (2020), "Implementation of seismic hazard mitigation on the basis of ground shear strain indicator for spatial plan of Bengkulu city, Indonesia", *International Journal of GEOMATE*, Vol.18, No.69, hal. 199–207. <https://doi.org/10.21660/2020.69.24759>.
- Hadi, A.I., Farid, M., Refrizon, Harlianto, B., Hudayat, N., dan Krisbudianto, M. (2021), "Interpretasi Tingkat Kekerasan Batuan Bawah Permukaan di Daerah Rawan Gempa Bumi Kota Bengkulu", *Indonesian Journal of Applied Physics*, Vol.11, No.1, hal.11. <https://doi.org/10.13057/ijap.v11i1.46525>.
- Hashash, Y.M.A., Dashti, S., Romero, M.I., Ghayoomi, M., dan Musgrove, M. (2015), "Evaluation of 1-D seismic site response modeling of sand using centrifuge experiments", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.78, hal. 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.07.003>.
- Kim, B., Hashash, Y.M.A., Stewart, J.P., Rathje, E.M., Harmon, J.A., Musgrove, M.I., Campbell, K.W., dan Silva, W.J. (2016), "Relative Differences between Nonlinear and Equivalent-Linear 1D Site Response Analyses", *Sage Journals*, Vol.32 No.3. <https://doi.org/10.1193/051215EQS068M>.
- Likitlersuang, S., Plengsiri, P., Mase, L.Z., dan Tanapalungkorn, W. (2020), "Influence of spatial variability of ground on seismic response analysis: a case study of Bangkok subsoils", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol.79 No.1, hal. 39–51. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01560-9>.
- Mase, L.Z. (2017), "Liquefaction potential analysis along coastal area of Bengkulu province due to the 2007 Mw 8.6 Bengkulu earthquake", *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Vol.49 No.6, hal. 721–736. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.6.2>.
- Mase, L.Z. (2020), "Seismic Hazard Vulnerability of Bengkulu City, Indonesia, Based on Deterministic Seismic Hazard Analysis", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.38 No.5, hal. 5433–5455. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01375-6>.
- Mase, L.Z., Tanapalungkorn, W., Likitlersuang, S., Ueda, K., dan Tobita, T. (2022), "Liquefaction analysis of Izumio sands under variation of ground motions during strong earthquake in Osaka, Japan", *Soils and Foundations*, Vol.62, No.5, Hal. 101218. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101218>.
- Misliniyati, R., Mase, L.Z., Irsyam, M., Hendriawan, Sahadewa, A. (2019), "Seismic response validation of simulated soil models to vertical array record during a strong earthquake", *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Vol.51, No.6, hal. 772–790. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.6.3>.
- Misliniyati, R., Mase, L.Z., dan Refrizon, (2024), "Upaya Peningkatan Budaya Sadar Bencana Gempa Melalui Analisis Statistik Parameter Geofisika di kota Bengkulu, Indonesia", *Wikrama Parahita*, Vol.8, No.1, hal. 69–77. <https://doi.org/10.30656/jpmwp.v8i1.6891>.
- Purnama, A.Y., Nurcahya, B.E., Nurhanafi, K., dan Perdhana, R. (2021), "Mikrozonasi Berdasarkan Data Mikrotremor dan Kecepatan Gelombang Geser di Kotamadya Yogyakarta", *Positron*, Vol.11, No.2, hal. 86-94. <https://doi.org/10.26418/positron.v11i2.46860>.

- Puteri, D.M., Affandi, A.K., Sailah, S., Hidayat, N., dan Zawawi, M.K. (2019), "Analysis of peak ground acceleration (PGA) using the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) method for Bengkulu earthquake of 1900 - 2017 period", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.1282, No.1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1282/1/012054>.
- Qodri, M.F., Mase, L.Z., dan Likitlersuang, S. (2019), "Simulation of Seismic Ground Response at Bangkok Subsoil due to Si Sawat Fault", (July), hal. 1–10.
- Sugianto, N., Frid, M. dan Suhendra (2017), "Kondisi Geologi Lokal Kota Bengkulu", *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, Vol.2, (April), hal. 29–36. <https://doi.org/10.21009/SPEKTRA.021.05>.
- Talukder, M.K., Rosset, P. dan Chouinard, L. (2021), "Reduction of Bias and Uncertainty in Regional Seismic Site Amplification Factors for Seismic Hazard and Risk Analysis", *GeoHazards*, Vol.2, No.3, hal. 277–301. <https://doi.org/10.3390/geohazards2030015>.
- Tempa, K., Sarkar, R., Dikshit, A., Pradhan, B., Simonelli, A.L., Acharya, S., dan Alamri, A.M. (2020), "Parametric study of local site response for bedrock ground motion to earthquake in Phuentsholing, Bhutan", *Sustainability (Switzerland)*, Vol.12, No.13. <https://doi.org/10.3390/su12135273>.
- Yoshida, N. (2015), "Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering Seismic Ground Response Analysis", *Springer*. Vol.36, <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2>.
- Yunita, H., Hendriyawan and Apriadi, D. (2015), "An overview of soil models for earthquake response analysis", *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Vol.47, No.1, hal. 57–75. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2015.47.1.5>.